

# 帶域壓縮 및 伸長에 의한 音響歸還安定度の改善

## Improvement of Acoustic Feedback Stability by Bandwidth Compression and Expansion

\* 廉 東 弘 (Yom, Dong-Hong)  
\*\* 安 秀 結 (Ann, Sou-Guil)

### 要 約

入力信号의 周波數를 一定周波數만큼 移動시키는 方法과 入力信号의 帶域을 壓縮시키는 方法이 殘響空間에서 擴聲裝置의 安定度余裕를 改善하는데 效果가 있음이 알려져있다. 이 論文은 入力信号의 帶域壓縮 및 伸長에 의해 音響歸還安定度を 改善하면서 音聲의 明瞭度를 維持하는 다른 接近方法의 效果에 對해 記述하고 있다. 이 技法을 具現하기 위한 條件을 誘導하고 實驗的裝置를 製作하였다. 比較的 작은 空間에서 一連의 實驗을 行한 結果, 安定度余裕에 있어 5 dB 以上の 改善을 얻을 수 있음을 보여 주었다.

### ABSTRACT

Both shifting the input signal's frequencies by a fixed frequency and compressing the input signal's bandwidth have been known to be effective in improving the stability margin of public address systems operating in reverberant spaces. This paper describes the effect of an alternative approach of improving the acoustic-feedback stability and yet maintaining speech intelligibility by bandwidth compression and expansion. Conditions are derived for this technique to be realized and an experimental system has been made-up. A series of experiments has been performed in small spaces and the results have shown that more than 5 dB improvement can be obtained in the stability margin.

### 1. 序 論

擴聲裝置 使用時 音響歸還路가 形成되면 歸還에 依한 不安定에 由인 擴聲裝置의 利得은 制限을 받게 된다. 特히 스피커와 마이크로폰을 같은 室內에서 使用하는 경우에 이러한 現象을 종종 觀察할 수 있다. 擴聲裝置의 利得을 增加시키기 위하여 여러가지 方法이 講究되었는데, 歸還信号의 勢力을 줄이는 方法과 歸還루프의 共振特性을 補償하는 方法 등은 代表的인 것이다. 前者의 경우 대표적인 例는 指向性 스피커와 마이크로폰을 使用하여 直接音에 의한 音響歸還을 避하도록 해

서 可能한 限 歸還信号의 勢力을 줄이는 것이다. 後者의 경우는, 대부분 室內의 周波數特性이 音의 多重反射에 의해 매우 甚한 凹凸의 樣相을 가지므로 [1] [2], 室內特性和 擴聲裝置特性을 包含한 루프特性 全般에 對하여 平坦한 特性을 갖도록 補償해주는 것이다. 그림 1에 한 작은 室內(서울대학교 工科大学 通信理論研究室)에서 루프特性 測定結果의 一部를 보이고 있다. 그림 1에서는 便直上 最大 루프利得의 크기를 0 dB로 取하였다. 그림 1을 觀察해 보면 비교적 좁은 周波數範圍內에 많은 共振點이 存在하는 것을 볼 수 있다. 가령 이러한 루프特性을 갖고 있는 擴聲系統

\* 정희원 : 서울대 대학원 박사과정, 수원대 전산학과 교수

\*\* 정희원 : 서울대 전자공학과 교수

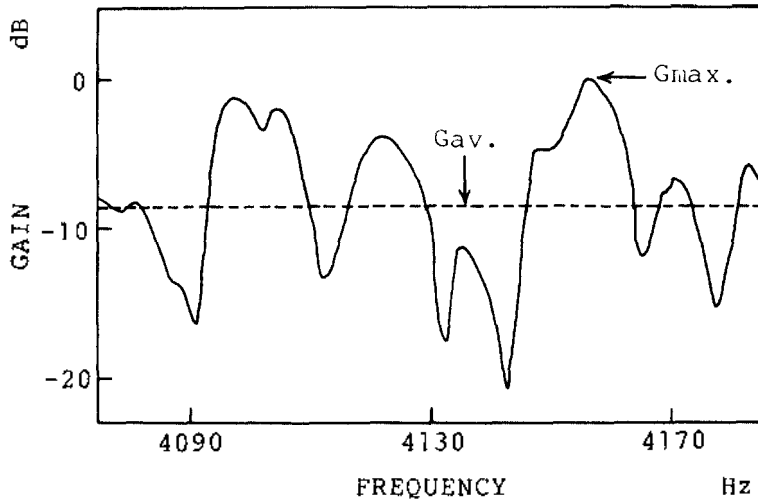


그림 1. 한 작은 室内에서의 루프特性的 일부  
 Fig.1 Section of loop characteristics in a small room

의 경우 이 共振點中 어느 하나라도 루프利得의 位相이  $2\pi$ 의 整數倍이면서 그 크기가 1을 넘어서기만 하면 그 擴聲系統은 不安定하게 될 것이다. 만일 루프特性이, 그림 1의 點線과 같이, 同一한 平均利得을 가진 平坦한 特性이라면, 實線과 같은 特性的 경우보다 安定度面에 있어서 大略  $G_{max}$ .와  $G_{av}$ .의 差에 該當하는 만큼 余裕를 갖게 될 것이다. 이러한 생각에 따라 루프特性을 平坦化하기 위해 여러가지 方法이 提案되었다. 그중 하나는 反共振回路를 必要한 만큼 多數 使用하여 室内特性을 補償하는 方法이다 [3]. 이 方法은 調整作業이 簡單하지 않고 또한 使用場所를 바꿀때마다 처음부터 再調整해야하므로 그 適用에 制限이 있다. 한편 Schroeder는 周波數 移動에 의해 安定度의 改善를 圖謀하는 方法을 發表하였는데 [4], 이 方法은 入力信號의 모든 周波數 成分을 一定周波數 만큼 移動시켜 出力케하는 方法으로서 等價의으로 루프利得을 周波數에 無關하도록 平坦化하는 效果를 가지고 있다. 이 方法이 어느 정도 安定度의 改善效果를 있지만 이러한 一定周波數 移動은 入力信號의 高調波關係를 破壞하게 된다. 이런 종류의 信號歪는 周波數 移動量이 비교적 큰 경우 音聲品質을 劣化시키게 된다. Alisobhani와 Knorr는 入力信號의 高調波關係를 維持하기 위해 帶域壓縮에 의한 方法을 發表하였다. [5]. 이 方法에서는 帶域壓縮效果를 얻기 위해 時間軸伸長技法을 사용하고 있는데, 이러한 경우 來時間 帶域壓縮動作을 위해서 週期的으로 入力信號의 一部를

잘라버리게 된다. 따라서 이 方法은 週期的인 信號 損失에 의한 또다른 종류의 信號歪를 發生시키게 되어 이에 따른 音聲品質의 劣化를 避할수 없게 된다.

이 論文은 安定度의 改善를 圖謀하면서 入力信號의 高調波關係도 維持하고 또한 信號의 損失도 避할수 있는 또다른 接近方法의 效果에 대해 記述하고 있다. 이 論文에서 提示하는 方法은 入力信號에 대하여 帶域壓縮 및 伸長을 交代로 行하는 것이다. 이러한 帶域壓縮 및 伸長效果를 얻기 위해서 時間軸伸長 및 壓縮技法을 使用하고 있으며, 따라서 時間軸伸長時 必然的으로 버려야한 信號部分을 壓縮時 使用하게 되어 全體的으로 信號의 損失이나 혹은 不必要한 附加를 避할수 있게 된다.

## II. 帶域壓縮 및 伸장에 따른 歸還安定度

提示된 方法에 따르면, 入力周波數  $f_0$ 에 대해 瞬時出力周波數는 帶域壓縮期間中에는  $(1-r)f_0$ 로 決定되며, 帶域伸長期間中에는  $(1+r)f_0$ 로 決定된다. 여기서  $r$ 은 帶域壓縮 및 伸長の 程度를 나타내는 파라미터이다. 만일 周波數  $f_0$ 의 信號가 帶域壓縮期間中  $n$ 번 歸還하였다면,  $n$ 번 歸還後의 信號周波數  $f_n$ 은  $(1-r)^n f_0$ 로 決定된다. 여기서  $r < 1$ 의 條件에  $f_n$ 은  $(1-r)f_0$ 로 近似시킬 수 있으므로 周波數  $f_n$ 에 대하여  $-rf_0$ 만큼의 周波數 移動效果를 얻을 수 있게 된다. 이와 類似하게 帶域伸長期間中에도 周波數  $f_0$ 에 대하여  $rf_0$ 만큼

급의 周波數移動效果를 얻게 된다. 따라서 周波數移動에 의한 安定度改善에 대한 Schroeder의 證明內容을 거의 그대로 利用할 수 있다.

여기서  $g(f)$ 를 複素루프利得이라 하자. 가령 루프內에 周波數 $f_0$ 의 信號가 帶域壓縮期間中 모두  $n$ 번 掃還되었다면,  $n$ 번 掃還後의 信號電力과 原信號電力과의 比는,  $r < 1$ 의 條件下에, 近似的으로 다음과 같이 表現될 수 있다.

$$M_n \cong |g(f_0 - \Delta f)|^2 \cdot |g(f_0 - 2\Delta f)|^2 \cdot \dots \cdot |g(f_0 - n\Delta f)|^2 \quad (1)$$

단,  $\Delta f = rf_0$ .

이를 데시벨로 表現하면

$$10 \log M_n \cong G(f_0 - \Delta f) + G(f_0 - 2\Delta f) + \dots + G(f_0 - n\Delta f) \quad (2)$$

$$\text{단, } G(f) \cong 10 \log |g(f)|^2$$

다시 式(2)는,  $n$ 이 充分히 크다는 조건하에, 다음과 같이 近似될 수 있다.

$$10 \log M_n \cong n G_{av} \quad (3)$$

여기서  $G_{av}$ 는 dB로 表現된 局部的인 平均電力利得이다. 式(3)으로부터 安定하기 위한 條件은 다음과 같이 쓸 수 있다.

즉,

$$G_{av} < 0 \quad (4)$$

帶域伸長期間에 대해서도 이와 類似한 結果를 얻을 수 있다. 따라서 安定하기 위한 條件은 共振點들의 利得에 無關하게 平均利得에 依存하게 된다. 以後의 證明課程은 Schroeder의 論文[4]에 자세히 記述되어 있으므로 省略한다. Schroeder에 따르면 대부분의 室內 및 擴聲裝置에 대하여 爽用的으로 5 ~ 8 dB의 改善를 얻을 수 있다고 予測하고 있다.

여기서 掃還回數 $n$ 에 대해 考慮할 必要가 있다. 왜냐하면 周波數移動方法의 경우는 掃還回數 $n$ 은 無限히 크다고 假定할 수 있으나 이 경우 掃還回數 $n$ 은 限定되기 때문이다. 帶域壓縮 혹은 伸長期間동안의 周波數移動量 $W$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$W = |(f_0 \pm \Delta f) - (f_0 \pm n\Delta f)| \\ = (n-1)\Delta f \\ = (n-1)rf_0 \quad (5)$$

만일  $W$ 가 너무 작으면 式(3)의  $G_{av}$ 는 極端的인 局部平均이 되어 루프特性的인 平坦化效果를 期待할 수 없게 될 것이다. 따라서 充分한 平坦化效果를 얻으려면  $W$ 는  $f_0$ 와 同量의 크기를 가져야 한다.

式(5)로부터,

$$nr \cong 1 \quad (6)$$

한편 掃還回數 $n$ 은 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$n \cong \frac{T}{2\tau} \quad (7)$$

단,  $T$ 는 帶域壓縮 및 伸長의 反復週期이며  $\tau$ 는 信號가 루프를 한번 돌아오는데 걸리는 時間이다.

여기서  $r$ 는 우리의 論議에 있어 定性的인 意味만으로 充分하므로 嚴密한 意味에서 定義될 必要는 없다. 式(6) 및 (7)로부터 充分한 平坦化效果를 얻기 위한 조건은

$$\frac{rT}{2\tau} \cong 1 \quad (8)$$

式(8)에서  $\tau$ 는 室內條件에 依存하는 量이지만  $r$  및  $T$ 는 容易하게 制御할 수 있는 量이다. 따라서  $r$  및  $T$ 를 適切히 選擇한다면 所期의 目的을 얻을 수 있을 것이다.

### Ⅱ. 帶域壓縮 및 伸長 動作

入力信號의 帶域壓縮 및 伸長을 行하기 위해 時間軸伸長 및 壓縮 技法을 使用한다. 入力를  $f(t')$ , 出力을  $g(t)$ 라 하고 다음과 같은 時間軸變換이 이루어진다고 하자.

$$t' = m(t) \quad (9)$$

그러면 入出力關係는

$$g(t) = f\{m(t)\} \quad (10)$$

이때 時間軸變換函數  $m(t)$ 는 다음의 條件을 滿足시키도록 한다.

1) 物理적으로 實現可能하기 위한 條件으로서

$$t \geq m(t) \quad (11)$$

2) 信號의 損失 혹은 不必要한 附加가 없기위한 條件으로서  $m(t)$ 는 連續이어야 한다.

上記 條件을 滿足하면서 帶域壓縮 및 伸長을 行할 수 있는  $m(t)$ 를 決定하기 위해 正弦波入力の 경우를 생각하기로 한다.

즉,

$$f(t') = \sin(\omega_0 t') \quad (12)$$

式(10) 및 (12)로부터 出力  $g(t)$ 는

$$g(t) = \sin\{\omega_0 m(t)\} \quad (13)$$

따라서 出力  $g(t)$ 의 瞬時間角周波數  $\omega$ 는 式(13)

으로부터

$$w = w_0 \frac{d}{dt} m(t) \dots\dots\dots (14)$$

한편 提案된 바에 따르면  $w$ 는 다음과 같아야 한다.

$$w = \begin{cases} (1-r)w_0, & (k-1)T \leq t < (k-\frac{1}{2})T \\ (1+r)w_0, & (k-\frac{1}{2})T \leq t < kT \end{cases} \dots\dots (15)$$

여기서  $k$ 는 整数이며  $T$ 는 压缩 및 伸장의 反復週期

그러면 式(14) 및 (15)로부터 다음과 같이  $m(t)$ 를 얻을 수 있다.

$$m(t) = \begin{cases} (1-r)t + A_k, & (k-1)T \leq t < (k-\frac{1}{2})T \\ (1+r)t + B_k, & (k-\frac{1}{2})T \leq t < kT \end{cases} \dots\dots (16)$$

여기서  $A_k$  및  $B_k$ 는 積分常數로서 上記한  $m(t)$ 의 條件을 滿足하도록 決定되어야 한다. 먼저 因果律條件 式(11)로부터

$$\begin{cases} A_k \leq (k-1)rT \\ B_k \leq -krT \end{cases} \dots\dots (17)$$

다음 連續條件으로부터

$$A_k - B_k = (2k-1)rT \dots\dots (18)$$

한편 式(16)은 다음과 같이 고쳐 쓸수 있다.

$$m(t) = t - d(t) \dots\dots (19)$$

여기서

$$d(t) = \begin{cases} rt - A_k, & (k-1)T \leq t < (k-\frac{1}{2})T \\ -rt - B_k, & (k-\frac{1}{2})T \leq t < kT \end{cases} \dots\dots (20)$$

式(19)는 式(16)의  $m(t)$ 에 의한 時間軸變換이 式(20)의  $d(t)$ 에 의한 時間遲延과 同等함을 보여주고 있다. 式(17), (18) 및 (20)에 의하면 遲延時間  $d(t)$ 는 振幅이  $\frac{rT}{4}$ 이고 平均은  $\frac{rT}{4}$ 以上인 三角波 函數임을 알 수 있다. 따라서 帶域压缩 및 伸장은 時間에 따라 變化하는 遲延器로써 具現될 수 있음을 알 수 있다.

IV. 實驗 및 結果

그림 2에 實驗裝置의 系統圖를 보이고 있다. 帶域 压缩 및 伸長裝置는 512段의 BBD(Bucket Brigade Device)와 이에 클럭을 供給하기 위한 클럭發生器로 構成되어 있다. 이 클럭發生器는 그 週期가 時間에 따라 三角波의으로 變化하는 클럭을 發生시키도록 設計되었다. 클럭週期를  $T_c$ 라고 하면 BBD에 의한 遲延時間  $d$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$d = \frac{512 \cdot T_c}{2} = 256 \cdot T_c \dots\dots (21)$$

여기서  $T_c$ 의 時間에 따른 變化週期가 BBD를 통과하는 信號의 最低周波數의 週期보다 充分히 크다면, 式(21)은 다음과 같이 고쳐 쓸수 있다. 즉,

$$d(t) \cong 256 \cdot T_c(t) \dots\dots (22)$$

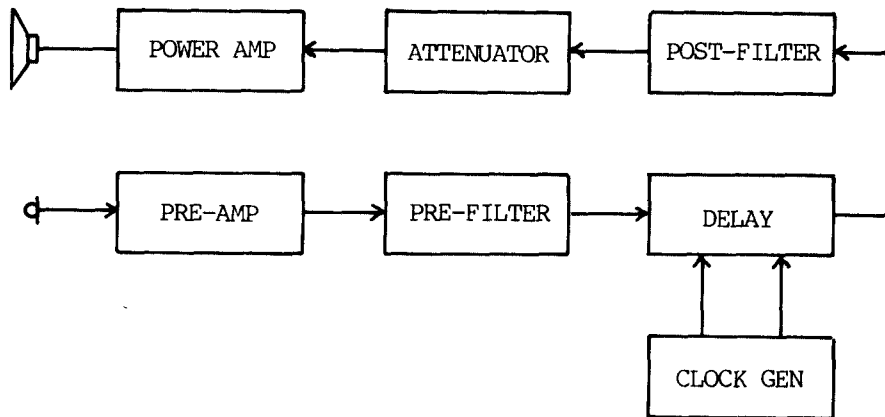


그림 2. 實驗裝置의 系統圖  
Fig.2 Block diagram of the experimental system.

實驗에서  $T_c(t)$ 는 平均  $20\mu s$  振幅  $\frac{rT}{1024} sec$ 인 三角波形이 되도록 하였으며, 그 週期는  $1 \sim 2 sec$  사이에서 調整할 수 있도록 하였다. 이에 따른 平均遲延時間은  $5.12ms$ 로서 聽感上 遲延에 따른 影響이 거의 없도록 하였다. 實驗裝置의 制約上  $rT$ 의 값은  $0.000 \sim 0.006$  사이에서  $T$ 의 값에 無關하게 調整할 수 있도록 하였다. 前段 및 後段濾波器는 平坦한 通過特性이 要求되기 때문에 6次 Butterworth 低域 通過濾波器를 使用하였다. 遮斷周波數는 各各  $7.6kHz$ 로서 音聲信號에 對해 充分한 帶域을 提共하고, 平均  $50kHz$ 의 클럭에 對한 aliasing 問題를 余裕있게 取扱할 수 있도록 하였다. 橫聲裝置 全般에 對한 周波數特性은  $24Hz$ 에서 약  $7kHz$ 까지 平坦한 特性을 나타내었다. 實驗場所로는  $50m^2$ 의 研究室用途의 空間과  $136m^2$ 의 實驗室用途의 空間을 挾하였다. 마이크로폰과 스피커는 直接音을 聽할수 있도록 通常의 配置를

表 1. 한 研究室 ( $50m^2$ )에서의 追加安定利得  
Table 1. Experimental data of the extra Stable gain in a study room ( $50m^2$ )

unit: dB

T(sec) \ rT	rT					
	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
1.0	1.4	2.9	4.0	3.8	5.1	5.1
1.2	1.3	2.7	3.8	3.9	4.5	5.0
1.4	1.4	2.5	3.8	4.3	4.8	4.7
1.6	1.3	3.1	3.6	4.2	4.5	5.4
1.8	1.6	2.7	3.6	4.4	4.7	4.9
2.0	1.6	2.9	3.3	4.4	4.9	5.2
Average	1.4	2.8	3.7	4.2	4.8	5.1

表 2. 한 實驗室 ( $136m^2$ )에서의 追加安定利得  
Table 2. Experimental data of the extra Stable gain in a laboratory ( $136m^2$ )

unit: dB

T(sec) \ rT	rT					
	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
1.0	2.3	3.9	4.7	4.9	5.3	5.9
1.2	2.4	4.0	4.5	4.8	5.1	5.8
1.1	2.5	4.0	4.7	4.9	5.3	5.3
1.6	2.4	4.1	4.6	5.1	5.2	5.6
1.8	2.3	4.0	4.7	4.9	5.0	6.0
2.0	2.3	4.0	4.7	5.2	5.6	6.0
Average	2.4	4.0	4.7	5.0	5.3	5.8

取하였다.

表 1 및 2에 實驗結果를 보이고 있다. 測定된 追加安定利得은 全般적으로  $T$ 의 값에는 거의 無關하나,  $rT$ 의 값에는 크게 相關함을 觀察할 수 있다. 그림 3 및 4는  $rT$ 의 變化에 따른 追加安定利得의 變化를 보이고 있다. 두 경우를 보면 대략  $rT = 0.006$ 以上에서  $5dB$ 以上의 追加安定利得을 얻을 수 있음을 볼 수 있다. 充分히 작은  $r$ 의 값과 充分히 큰  $T$ 의 값을 使用했기 때문에 予想한대로 音聲品質의 劣化는 거의 느낄수 없었다.

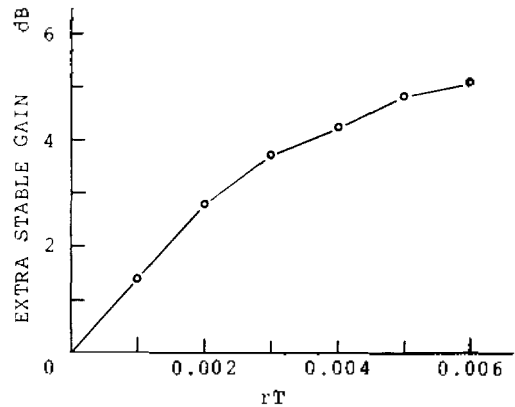


그림 3. 한 研究室 ( $50m^2$ )에서의  $rT$ 의 變化에 따른 追加安定利得

Fig. 3. Extra stable gain as a function of  $rT$  in a study room ( $50m^2$ )

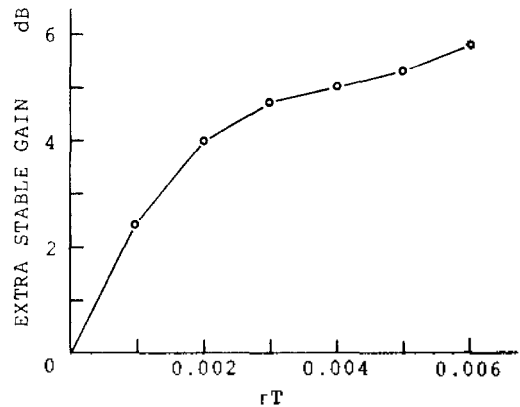


그림 4. 한 實驗室 ( $136m^2$ )에서의  $rT$ 의 變化에 따른 追加安定利得

Fig. 4. Extra stable gain as a function of  $rT$  in a laboratory ( $136m^2$ )

## V. 結 論

帯域圧縮 및 伸長에 의한 音響帰還安定度の 改善方法에 對해 記述하였다. 提示된 方法을 具現하기 위한 條件을 誘導하고 이에 따라 實驗的裝置를 製作하였다. 比較的 制限된 條件下에서 實驗을 行한 結果, 本方法의 勿用性和 또한 本方法에 있어  $r$  및  $T$ 의 積이 主要한 變이라는 事實을 確認할 수 있었다. 此後 보다 多様な 條件下에서의 實驗結果가 期待된다. 本方法을 具現하기 위한 裝置의 構成이 比較的 簡單하므로 擴聲電話器, 長距離電話回線의 增幅器 等에의 應用도 考慮해 볼 수 있을 것이다.

## 參 考 文 獻

1. R.H. Bolt and R.W. Roop, "Frequency response fluctuations in rooms," *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 22, pp. 280-289, 1950.
2. M.R. Schroeder and K.H. Kuttruff, "On frequency response curves in rooms. Comparison of experimental, theoretical, and Monte Carlo results for the average frequency spacing between maximas," *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 34, pp. 76-80, Jan. 1962.
3. C.P. Boner and C.R. Boner, "Minimizing feedback in sound systems and room-ring modes with passive networks," *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 37, pp. 131-135, 1965.
4. M.R. Schroeder, "Improvement of acoustic-feedback stability by fequency shifting," *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 36, pp. 1718-1724, 1964.
5. J. Alisobhani and S.G. Knorr, "Improvement of acoustic-feedback stability by bandwidth compression", *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, Vol. ASSP-28, No. 6, Dec. 1980.